

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ

Лузгин В.И., Шестовских А.Е., Петров А.Ю., Коптяков А.С.

ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация – В статье описаны ультразвуковые излучатели большой мощности, осуществляющие обработку несмешиваемых жидкостей и твердых порошковых материалов при высокоэнергетическом акустическом воздействии. Приведены результаты разработки и конструирования магнитострикционных преобразователей и установок для получения нанодисперсных эмульсий и суспензий. Показана эффективность получения нанодисперсных эмульсий ультразвуковым методом на примере получения водо-масляных эмульсий.

Ключевые слова – ультразвуковые технологии, магнитострикционные преобразователи, ультразвуковые генераторы, нанодисперсные эмульсии.

Ультразвуковые волны, распространяющиеся в любой среде, вызывают циклы сжатия и разрежения этой среды. Во время циклов разрежения возникают локальные понижения давления и в жидкости, в результате чего молекулы среды отделяются друг от друга, образуя парогазовые полости (пузырьки). При взаимодействии с ультразвуковой волной эти пузырьки будут непрерывно поглощать энергию волны в течение чередующихся циклов сжатия и разрежения. При достижении критических размеров для данной частоты колебаний пузырьки уже не могут эффективно поглощать энергию ультразвука, так как уже нарушаются резонансные свойства системы. Без подвода энергии извне пузырьки не могут существовать, поэтому при очередном цикле сжатия они схлопываются. При схлопывании пузырьков образуются условия для протекания необычных химических и физических процессов. Газы и пары внутри пузырьков сжимаются, интенсивно выделяя тепло, за счет которого температура вблизи схлопнувших пузырьков может достигать 3000-5000 °С, а давление – до 300 МПа. Эффективность технологического процесса в жидкостях под действием ультразвука (разрушение поверхностных пленок, ультразвуковое эмульгирование и диспергирование, ультразвуковая очистка и др.) обусловлены, в основном, максимальным давлением и температурой пара и газа в полости (пузырьке) на конечной стадии схлопывания.

Процесс образования и схлопывания парогазовых пузырьков при воздействии ультразвука на жидкую среду принято называть кавитацией. Именно процесс

кавитации используется, в основном, во многих ультразвуковых технологиях, в том числе и при эмульгировании/диспергировании эмульсий и суспензий.

При получении водных эмульсий и суспензий ультразвуковыми технологиями вода под действием кавитации расщепляется на высокореакционноспособные атомы водорода (H) и радикалы гидроксида (OH). На быстрой стадии охлаждения атомы водорода и радикалы гидроксида рекомбинируются с образованием перекиси водорода (H₂O₂) и молекулярного водорода (H₂). Если к воде, облученной ультразвуком, добавить другие соединения, то в них могут происходить многие вторичные реакции. Органические соединения интенсивно разлагаются в такой среде, а неорганические – могут окисляться или восстанавливаться. Этими явлениями объясняется широкое применение воды в ультразвуковых технологиях.

В зависимости от области применения и назначения эмульсии и суспензии должны обладать соответствующими характеристиками и физико-химическими свойствами. Так, дисперсии, которые используются непосредственно после изготовления, и к которым нет жестких требований по дисперсности состава, могут изготавливаться по упрощенной технологии с применением гидродинамических преобразователей. Такие эмульгирующие устройства просты в изготовлении и эксплуатации, позволяют достигать больших производительностей продукта, однако качество продукта далеко не всегда удовлетворяет требованиям технологических процессов, в которых используются данные дисперсии. Такие эмульсии могут быть как прямого, так и обратного типа. Их дисперсность не высока и составляет десятки и сотни микрометров.

Дисперсии, предназначенные для длительного хранения, должны обладать высокой гомогенностью и дисперсностью состава и быть устойчивыми к расслоению компонентов. Устойчивостью к расслоению обладают только высокодисперсные обратные наноэмульсии.

Эмульсии с такими свойствами можно получить, используя ультразвуковые эмульгаторы и диспергаторы.

Так, получение наноэмульсий достигается технологией ультразвукового эмульгирования, которая обеспечивает переход одной из взаимно нерастворимых жидкостей в дисперсное состояние в среде другой под действием акустических течений и кавитации. Ультразвуковой способ эмульгирования позволяет получить высококачественную, устойчивую, практически монодисперсную наноэмульсию.

Дисперсность такой эмульсии может достигать 100 и менее нанометров.

Ультразвуковое диспергирование – это технология получения наносuspensions путем тонкого размельчения твердых веществ в жидкой среде, т.е. переход твердых веществ в дисперсное состояние под действием кавитационной эрозии, вызванной акустическими колебаниями. Ультразвуковое диспергирование позволяет получать высокодисперсные (эквивалентный диаметр частиц – доли микрометра), однородные и химически чистые наносuspensions и нанопорошки.

Несмотря на то, что локальные значения температуры и давления, достигаемые при пороговой кавитации, экстремальны, можно успешно контролировать протекание сонохимических реакций. На интенсивность схлопывания кавитационных пузырьков и, следовательно, на характер реакции влияют такие факторы, как конструктивные особенности эмульгатора/диспергатора, частота ультразвуковых волн, акустическое давление, интенсивность и эпюра акустического поля, температура обрабатываемого продукта, статическое давление в рабочей камере, природа жидкостей и газов, растворенных в этих жидкостях. При обработке суспензий на скорость диспергирования влияют также механические свойства и структура обрабатываемых компонентов твердой фазы, состояние их поверхности, геометрическая форма. На скорость диспергирования оказывают влияние также вязкость и плотность жидкости, посторонние включения и другие факторы, на которые невозможно влиять характеристиками диспергаторов.

Установлено, что кавитационная эрозия значительно усиливается с ростом скорости жидкости. Все это говорит о целесообразности совмещения ультразвукового диспергирования с другими методами воздействия: механическими, химическими и т.д.

Не смотря на определенные трудности по интенсификации ультразвуковой технологии, необходимо разрабатывать и использовать такие эмульгаторы и диспергаторы, которые позволяли бы изменять и контролировать максимальное количество параметров и факторов, влияющих на скорость обработки эмульсий и суспензий.

Решение этой задачи требует разработки ультразвуковых эмульгаторов и диспергаторов нового поколения, в которых достигается повышение мощности ультразвукового воздействия и обеспечивается оптимальное управление процессом акустической кавитации.

Известно, что поддерживая определенное соотношение между статическим и акустическим давлениями в рабочей камере, можно управлять процессами кавитации, плавно изменяя интенсивность воздействия ультразвукового поля на обрабатываемые жидкости и суспензии. Ступенчатое изменение

интенсивности воздействия можно достичь, меняя размер резонансных кавитационных пузырьков путем перехода на другие частотные диапазоны, выделенные нормативными документами для технологических целей. В этом случае конструкция установки должна предусматривать смену акустического звена для получения требуемой частоты обработки.

Эффективным методом интенсификации ультразвуковых процессов является наложение двух кратных по частоте акустических полей, возбуждаемых в рабочей камере. Периодические резонансные биения, возникающие от наложения акустических волн кратных частот, вызывают всплески амплитуд локально избыточного давления, пропорционально квадрату которого возрастает акустическая интенсивность обработки жидкости. Возрастание пиковых значений локального избыточного давления существенно ускоряет процессы эмульгирования и диспергирования без увеличения установленной мощности ультразвукового оборудования.

На рис. 1 приведена конструктивная схема двухчастотного эмульгатора, в которой реализуется эффект сложения радиального и аксиального акустических полей кратных частот.

В эмульгаторах и диспергаторах проточного типа, в которых возбуждаются продольные акустические волны, наиболее эффективный резонансный режим обработки среды должен обеспечиваться правильным выбором длины рабочей камеры. Соблюдение этих условий приводит к интерференции падающей и отраженной волн. В результате суперпозиции в рабочей камере формируется режим стоячей волны. Для незатухающих колебаний амплитуда стоячей волны определяется выражением:

$$A_c = 2A \cos \frac{2\pi \cdot r}{\lambda}, \quad (1)$$

где A_c – амплитуда стоячей волны;

A – амплитуда бегущей волны;

$r = L$ – текущее значение координаты, в частном случае, равное длине рабочей камеры;

λ – длина волны в обрабатываемой среде.

Связь амплитуды колебаний среды и интенсивности для стоячей волны выражается соотношением:

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot (2A)^2 \cdot \rho \cdot c, \quad (2)$$

где I – интенсивность выделения энергии;

ω – круговая частота ультразвуковой волны;

$A_c = 2A$ – амплитуда колебаний стоячей волны (амплитуда колебаний среды);

ρ – плотность среды;

c – скорость волны в среде.

Из выражения (1) следует, что в системах без потерь амплитуда колебаний среды в режиме стоячей волны в два раза превышает амплитуду бегущей волны.

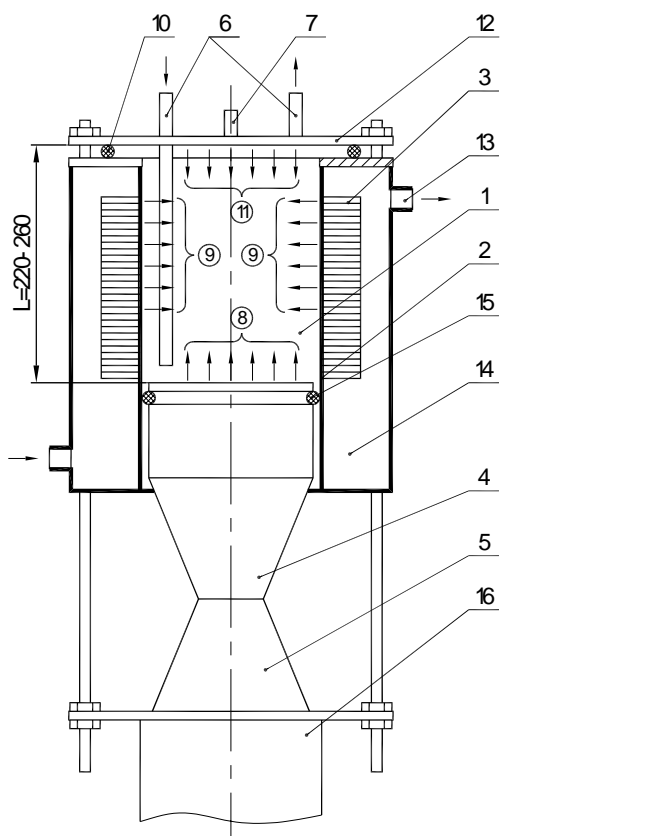


Рис. 1. Ультразвуковой эмульгатор/диспергатор УЗЭД-5-9/5-18:

- 1 – Рабочая камера;
- 2 – Стенка (труба) рабочей камеры;
- 3 – Магнитопровод (магнитострикционный пакет) кольцевого преобразователя;
- 4 – Концентратор стержневого преобразователя;
- 5 – Стержневой магнитострикционный преобразователь;
- 6 – Штуцеры подачи и отвода обрабатываемой жидкости;
- 7 – Штуцер подачи газа;
- 8 – Направление распространения продольных бегущих волн, создаваемых стержневым преобразователем;
- 9 – Направление распространения цилиндрических волн, создаваемых кольцевым преобразователем;
- 10 – Уплотнительное кольцо;
- 11 – Направление распространения отраженной волны;
- 12 – Съемная крышка;
- 13 – Штуцер бачка охлаждения кольцевого преобразователя;
- 14 – Бачок охлаждения кольцевого преобразователя;
- 15 – Уплотнительное кольцо;
- 16 – Бачок охлаждения стержневого преобразователя.

Из выражений (1) и (2) следует, что при резонансном режиме обработки среды интенсивность обработки увеличивается более чем в четыре раза. Следовательно, обеспечение резонансного режима работы всех звеньев акустической цепи ультразвуковой установки не только повышает ее КПД, но и интенсивность обработки эмульсий и суспензий.

При обработке эмульсий, особенно при обработке водно-органических суспензий, следует стабилизировать температурный режим обрабатываемой жидкости, поскольку при высоких температурах эффективность обработки снижается, а органические соединения могут разлагаться, увеличивая потери конечного продукта. Для ряда технологических процессов оптимальной температурой среды считается (60-65) °С. Поэтому конструкцией эмульгатора должна быть предусмотрена эффективная система охлаждения обрабатываемой жидкости. При мощных акустических полях решить эту проблему довольно сложно, так как ультразвуковая энергия выделяется в объеме обрабатываемой среды, а теплоотдача осуществляется только от стенок рабочей камеры, материал которой, как правило, имеет низкую теплопроводность.

Вторая проблема при проектировании эмульгаторов и диспергаторов заключается в том, что интенсивность процессов эмульгирования и диспергирования ограничивается усталостной прочностью металла, из которого изготавливаются излучающие поверхности и кавитационной эрозией этих поверхностей. Поэтому рабочие камеры необходимо изготавливать из кавитационно-стойких сталей и сплавов, используя фокусировку акустических полей. Снижение процесса эрозии излучающих поверхностей позволяет также повысить чистоту получаемого продукта – эмульсии/суспензии.

Проведенные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы позволили разработать технический проект и изготовить опытный образец одночастотного эмульгатора/диспергатора на основе магнитострикционного ультразвукового преобразователя стержневого типа. На рис. 2 представлен общий вид установки ультразвуковой непрерывной обработки жидкости проточного исполнения типа УЗЭД-5-18.



Рис. 2 Общий вид установки УЗЭД-5-18

Конструктивно эмульгатор/диспергатор состоит из магнитострикционного преобразователя, проточной

акустической камеры с устройством подачи газа под давлением и рамы, в шарнирах которой обеспечивается поворот ультразвукового агрегата.

Элементы конструкции стержневого магнитострикционного преобразователя мощностью 5 кВт, частотой 18 кГц приведены на рис. 3. Он состоит из магнитопровода с обмотками акустического концентратора для передачи механических колебаний на рабочую поверхность и цилиндрического бачка, через который подается охлаждающая жидкость.



Рис. 3. Стержневой магнитострикционный преобразователь

Магнитопровод выполнен в виде пакета тонких листов пермендюра (сплав железа и кобальта), обладающего высокой магнитострикционной деформацией при воздействии магнитного поля. При протекании высокочастотного тока по обмоткам возникают механические колебания торца магнитопровода повышенной амплитуды, которые передаются через акустический концентратор на рабочую поверхность камеры.

Характеристики магнитострикционного преобразователя ПМС-5-18

Характеристики ПМС-5-18:

Напряжение питания, В	- 440±44
Частота колебаний, кГц	- 18±1,35
Мощность электрическая, кВт	- 5±0,4
Ток поляризации, А	- 15±6
Амплитуда смещения, не менее, нкм	- 12±3

Размеры проточной акустической камеры выбираются такими, чтобы выполнялись условия резонансного режима работы всей акустической системы с учетом свойств обрабатываемой жидкости.

Ранее уже указывалось на необходимость обеспечивать резонансный режим работы обрабатываемой среды. Для выполнения этого условия в разработанном эмульгаторе/диспергаторе длина рабочей камеры, вдоль которой распространяются продольные волны, может меняться, чтобы обеспечить условие резонанса. Длина камеры определяется из выражения:

$$L = \frac{n\lambda}{2} = \frac{n\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta_c}}, \quad (4)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$;

λ - длина волны в среде;

β_c - адиабатический коэффициент сжимаемости среды.

Поэтому для конкретных жидкостей или суспензий необходимо расчетным или опытным способом определить длину камеры и, перемещая акустическое звено вдоль трубы эмульгатора/диспергатора установить требуемый размер камеры.

Конструкция разработанного устройства позволяет в рабочей камере создавать избыточное давление при помощи подачи газа под давлением. В общем случае, соотношение между статическим и звуковым давлением определяется выражением:

$$P_{ст.} = (0,4 \div 0,5) \cdot P_{зв.} = (0,4 \div 0,5) \cdot \omega \cdot A \cdot \rho \cdot C,$$

где $P_{ст.}$ - статическое давление в невозмущенной среде;

$P_{зв.}$ - амплитуда звукового давления.

В зависимости от частоты продольных колебаний и параметров среды статическое давление в рабочей камере данного эмульгатора/диспергатора может составлять (0,3÷0,6) МПа.

Электропитание обмоток магнитострикционного преобразователя токами высокой частоты и постоянным током поляризации осуществляется от разработанного для этих целей ультразвукового генератора типа УЗГК-5-18. Общий вид генератора представлен на рис. 4.



Рис. 4. Ультразвуковой генератор УЗГК-5-18

По результатам НИР разработана рабочая конструкторская документация на двухчастотный эмульгатор/диспергатор, построенный на базе стержневого

и кольцевого ультразвуковых магнитострикционных преобразователей.

Предприятием "РЭЛТЕК" изготовлен опытный образец двухчастотного эмульгатора/диспергатора, общий вид которого приведен на рис. 5.



Рис. 5. Ультразвуковая установка УЗЭД-5-9/5-18

Разработанный эмульгатор/диспергатор типа УЗЭД-5-9/5-18 комплектуется магнитострикционным преобразователем стержневого типа ПМС-5-18, кольцевым магнитострикционным преобразователем КМС-5-9 и ультразвуковым генератором модульного исполнения УЗГМ-10-22 МС. Каждый преобразователь питается от своего модуля, которые обеспечивают необходимый режим работы преобразователей, включая автоматическую подстройку резонансной частоты.

Элементы конструкции кольцевого магнитострикционного преобразователя КМС-5-9 приведены на рис. 6.

Характеристики КМС-5-9:

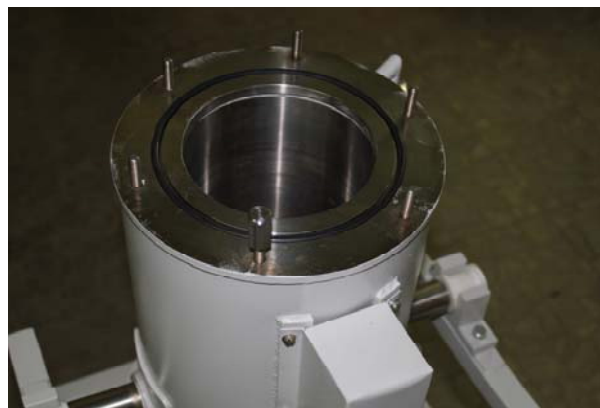
Напряжение питания, В	- 440±44 (660)
Частота колебаний, кГц	- 9±0,5
Мощность электрическая, кВт	- 5±5
Ток поляризации, А	- 14±6
Диаметр рабочей камеры, мм	- 150±0,5
Длина рабочей камеры, мм	- 220÷260

Рабочая камера выполнена из тонкостенной металлической трубы цилиндрической формы, на которую напрессован магнитопровод кольцевого преобразователя. Диаметры магнитопровода для заданной частоты определяется из выражения:

$$\pi \cdot D_{\text{ср.}} = \lambda, \quad (3)$$

где $D_{\text{ср.}}$ – средний диаметр магнитопровода;
 λ - длина звуковой волны в материале магнитопровода.

Излучающий конец акустического концентратора стержневого преобразователя герметично соединен с внутренней полостью трубы рабочей камеры и может при помощи специального устройства перемещаться вдоль трубы на некоторое устройство, изменяя объем и длину рабочей камеры. Излучающая поверхность концентратора выполнена вогнутой, сферической.



а



б

Рис. 6. Элементы конструкции КМС-5-9:
а – общий вид без крышки; б – кольцевой магнитопровод с обмотками

Ступенчатый переход от одной технологической частоты продольных колебаний на другую может осуществляться сменой акустического звена, в состав которого входит концентратор и магнитострикционный преобразователь стержневого типа.

Второй конец трубы рабочей камеры закрыт съемной крышкой, на которой могут быть установлены проточные штуцеры, штуцер подачи газа для создания статического давления и другой оборудование. Оба преобразователя помещены в баки для охлаждения жидким хладагентом, например, водой или антифризом.

Принцип работы преобразователей основан на эффекте магнитострикции. Благодаря магнитострикционной деформации магнитопровод кольцевого преобразователя передает в обрабатываемую среду через стенку рабочей камеры радиальные механические колебания. Интенсивность ультразвуковых волн возрастает к центру трубы, и акустическое поле фокусируется в осевой линии рабочей камеры.

Концентратор стержневого преобразователя создает в обрабатываемой среде продольные ультразвуковые волны, которые направлены перпендикулярно к плоскости цилиндрических волн, создаваемых кольцевым преобразователем. Акустическое поле продольных волн частично сфокусировано к центру рабочей камеры. Фокусировка акустических полей позволяет снизить кавитационную эрозию излучающих поверхностей и концентрирует мощную энергию в локальном объеме рабочей камеры.

Благодаря наложению акустических полей с двумя резонансными частотами в жидкости образуются кавитационные пузырьки с различными эквивалентными диаметрами. Чем ниже частота акустического поля, тем крупнее в жидкости формируются полости разрежения – паргазовые пузырьки и тем больше они выделяют энергии при схлопывании. При эмульгировании жидкости высокоэнергетические пузырьки разрушают прочные межмолекулярные связи, укорачивая молекулярные цепочки, и формируют условия для дальнейшего разрушения ослабленных межмолекулярных связей кавитационными пузырьками меньшего размера. Аналогичные процессы происходят при диспергировании. Более крупные пузырьки, обладая повышенной энергией, деформируют крупные частицы твердой фракции суспензии. Более мелкие пузырьки, проникая в эти дефектные полости и микротрещины частиц, диспергируют их. Таким образом, ускоряются процессы эмульгирования и диспергирования в жидкостях.

Кроме этого, в камере двухчастотного эмульгатора возникают биения, приводящие к резкому мгновенному возрастанию амплитуды колебаний, что, наряду с увеличением интенсивности обработки, усиливает турбулентность акустических течений, способствующих перемешиванию жидкостей.

Применение в эмульгаторе/диспергаторе мощного ультразвукового двухчастотного поля в сочетании его с повышенным статическим давлением в рабочей камере показало целесообразность использования ультразвукового метода обработки жидкости в промышленных масштабах, подтвердило его эффективность, наряду с другими методами эмульгирования и диспергирования.

Оценка эффективности ультразвукового кавитационного метода получения нанодисперсных эмульсий, производилась на примере эмульгирования смеси: 80% растительного масла и 20% воды.

Обработка данной смеси производилась в акустической камере двухчастотного ультразвукового эмульгатора УЗГД-5-9/5-18 при избыточном статическом давлении в камере 0,4 МПа в течение 5 минут. Структурный анализ полученной водо-

масляной эмульсии производился спектральным методом на приборе "Malvern".

Результаты испытаний приведены ниже в Протоколе автоматизированной обработки данных измерений.

Size Distribution Report by Number

v2.2



Sample Details

Sample Name: W-in-O 2
SOP Name: mansettings.nano
General Notes: вода в масле
масло: показатель преломления 1,47
вязкость 55,7 мПа·с
File Name: lab 8.dts
Record Number: 73
Material RI: 1.33
Material Absorption: 0.100
Dispersant Name: Oil
Dispersant RI: 1.470
Viscosity (mPa.s): 55.7000
Measurement Date and Time: 4 октября 2013 г. 11:19:37

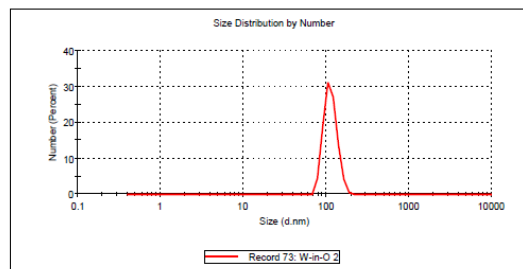
System

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 147.0
Cell Description: Disposable sizing cuvette
Duration Used (s): 80
Measurement Position (mm): 1.25
Attenuator: 7

Results

Size (d.nm)	% Number	St Dev (d.nm)
Z-Average (d.nm): 139.3	Peak 1: 114.3	100.0
PdI: 0.291	Peak 2: 0.000	0.0
Intercept: 0.904	Peak 3: 0.000	0.0

Result quality Refer to quality report



По результатам измерений зарегистрирована полидисперсность эмульсии с размером частиц 114 ± 21 нм, что подтверждает эффективность ультразвукового метода обработки водо-масляных смесей для получения нанополдисперсных эмульсий. Данная эмульсия используется в пищевой промышленности при выпечке хлебобулочных изделий в качестве антипригарного средства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ № 2284215. Кольцевой магнитострикционный преобразователь / Шестовских А.Е., Петров А.Ю., Лузгин В.И., Кандалинцев Б.А. Опубликовано 27.09.2006, бюл. № 27.
2. Патент РФ № 2284216. Ультразвуковая установка / Шестовских А.Е., Петров А.Ю., Лузгин В.И., Кандалинцев Б.А. Опубликовано 27.10.2006, бюл. № 30.
3. Лузгин В.И., Шестовских А.Е., Кандалинцев Б.А. Ультразвуковое оборудование и методы получения нанодисперсных эмульсий и суспензий. Сб. трудов 3-ей Международной научно-практической конференции "Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии" 16 мая 2013 г., г. Екатеринбург.